

Application of Arduino microcontrollers and data processing using MatLab applied to the internal combustion engine test

Fernando G. Russo, becario est.¹, Verónica C. Fonteriz, becario est.¹, Diego C. Caputo, Ing.^{1,2}, Pablo G. Cavataio, Ing.², Nestor E. A. Ferré, Ing.¹ y Gabriel A. Receloglu, becario est.¹

¹Universidad Tecnológica Nacional FRBA, Argentina, f.g.russo@hotmail.com

²Universidad de la Marina Mercante Facultad de Ingeniería, Argentina, dcaputo@udemmm.edu.ar

Abstract— *The layout of the open diagram of an internal combustion engine (MCI) provides important information for the development of calculation models and the study of the work cycle behavior. Determining these diagrams, parameters such as the pressure developed in the cylinder as a function of the angle of rotation must be measured, as well as the reference of the top dead center. The storage and processing of the information can become a slow and arduous task by means of the traditional method using a digital oscilloscope that stores the information received during a predetermined fixed time, and then stored in a portable memory and processed with a calculation software. Validate models based on experimental results requires flexible and fast ways to obtain a representative number of samples that support the employed method.*

This work shows the use of an Arduino DUE commercial microcontroller, of the Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 family, to accelerate the measurement process of the open cycle without combustion engine test, facilitating its visualization and understanding of the phenomenon in real time through an own interface, being able to link it directly with MATLAB software. The presented solution improves the reliability of the measurements at a lower cost than the traditional method, taking advantage of the flexibility of the microcontroller to program the appropriate number of samples to each measurement and adding the freedom provided by an open source tool.

Keywords: *Motor test. Indicated cycle. Arduino. MatLab. Pressure function.*

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.434>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Aplicación de microcontroladores Arduino y procesamiento de datos utilizando MatLab aplicado al ensayo de motores de combustión interna.

Fernando G. Russo, becario est.¹, Verónica C. Fonteriz, becario est.¹, Diego C. Caputo, Ing.^{1,2}, Pablo G. Cavataio, Ing.², Nestor E. A. Ferré, Ing.¹ y Gabriel A. Receloglu, becario est.¹

¹Universidad Tecnológica Nacional FRBA, Argentina, f.g.russo@hotmail.com

²Universidad de la Marina Mercante Facultad de Ingeniería, Argentina, dcaputo@udem.edu.ar

Abstract— El trazado del diagrama abierto de un motor de combustión interna (MCI) aporta información importante para el desarrollo de modelos de cálculo y el estudio del comportamiento del ciclo de trabajo. En la determinación de estos diagramas se deben medir parámetros como la presión desarrollada en el cilindro en función del ángulo de giro, así como también la referencia de punto muerto superior. El almacenamiento y procesamiento de la información de dichas mediciones puede tornarse una tarea lenta y ardua mediante el método tradicional consistente en la utilización de un osciloscopio digital que almacena la información recibida durante un tiempo fijo predeterminado, para luego guardarse en una memoria portátil y procesarla con un software de cálculo. La necesidad de validar modelos basados en resultados experimentales requiere formas flexibles y rápidas de obtener una cantidad representativa de muestras que avalen el método utilizado.

En este trabajo se muestra la utilización de un microcontrolador comercial Arduino DUE, de la familia Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, para acelerar el proceso de medición del ciclo abierto sin combustión de un motor de prueba, facilitando su visualización y la comprensión del fenómeno en tiempo real a través de una interfaz propia, pudiéndolo vincular directamente con el software MATLAB. La solución presentada mejora la confiabilidad de las mediciones a un costo mucho más bajo que el método tradicional, aprovechando la flexibilidad del microcontrolador para programar el número de muestras adecuado a cada medición y agregando la libertad que provee una herramienta open source.

Keywords—Ensayo de motores, ciclo indicado, Arduino, MATLAB, curva de presión.

I. INTRODUCCIÓN.

La mayoría de los modelos de aplicación práctica para la obtención de los parámetros energéticos derivados del ciclo de trabajo de los motores de combustión interna se obtienen mediante métodos físicos – matemáticos, que requieren de la obtención de ciertos datos en forma experimental. En general, la determinación del ciclo de trabajo requiere de sensores que permitan medir la variación de presión o temperatura en el interior del cilindro. Estos datos deben evaluarse en función del tiempo y correlacionarse con la posición del eje del motor, y de esta forma a través de cálculos, determinar el volumen del cilindro para cada valor de presión o temperatura medido. Estas metodologías requieren equipamiento muy preciso y costoso, ya que resulta necesario determinar con precisión valores muy elevados de presión o temperatura, resolviendo las mediciones a muy altas velocidades ($t \leq 50\text{ms}$) y con repetitividad. El modelo del ciclo indicado previsto (CIPREV) aplicado en este trabajo utiliza el concepto de superposición de efectos en ensayos realizados bajo las mismas condiciones de carga y velocidad de giro del motor,

evitando de esta forma, la simultaneidad de condiciones extremas durante el ensayo. Así, por ejemplo, se obtiene el ciclo abierto de las presiones sin combustión, el cual permite caracterizar la carrera de admisión y compresión, pero evitando la condición extrema que agrega el proceso de combustión en cuanto a temperatura y presión desarrollada. Luego, con un análisis de los productos de combustión (a la misma velocidad de giro y estado de carga) se determina la temperatura probable de combustión, y por cálculos, se obtiene la presión desarrollada. Por último, a través de imágenes termográficas infrarrojas se determina la temperatura de inicio del proceso de compresión, que permite caracterizar el coeficiente politrópico de la transformación.

Al superponer los resultados de los tres ensayos, este método permite obtener con cierta precisión el ciclo de trabajo del motor sin medirlo directamente, restando exigencias extremas a los sensores, motivo por el cual se puede recurrir a la utilización de equipamiento corriente de uso industrial a costos muy accesibles. No obstante, uno de los mayores problemas que presenta el análisis de las señales de presión de los ciclos de trabajo de los motores de combustión interna, tanto para métodos indirectos como para métodos de medición directa, radica en la forma en que se correlacionan los resultados de presión o temperatura con la posición angular del eje del motor, y el tiempo que demanda el procesamiento manual de la información, aunque ésta sea obtenida por medios electrónicos.

En este trabajo se presenta una aplicación de microcontroladores Arduino, para la adquisición de datos provenientes de dos sensores industriales. El primero es un sensor de presión analógico instalado en el cilindro número cuatro del motor, y el segundo es un sensor inductivo que capta la posición del pistón en su paso por el punto muerto superior (PMS). Todo ello realizado sobre un motor de combustión interna de encendido a chispa. Los datos experimentales se procesan a través del software MatLab, obteniéndose por resultado la curva de presión sin combustión más probable sobre la base de una cantidad de ciclos medidos. MatLab correlaciona los datos disminuyendo la dispersión de resultados, y facilitando su procesamiento. Por último, se compara los resultados con los obtenidos directamente del osciloscopio digital, y procesados manualmente en Excel.

II. METODOLOGÍA.

La fase experimental se llevará a cabo obteniendo la señal de presión sin combustión proveniente de un sensor analógico de uso habitual en la industria marca Danfoss,

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.454>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

modelo MBS 3000 – 2211-1 AB04, tipo 060G1133 con una presión máxima de trabajo de 16 bar, una temperatura máxima de operación de 85°C y velocidad de respuesta <4ms. Para la posición angular se utilizará un sensor Siemens serie Simatic PXI 200, modelo 3RG4075-0AJ00 con frecuencia de operación hasta 100Hz.

Para el procesamiento de la señal propuesto en la introducción se utilizará un microcontrolador Arduino, modelo DUE (Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3) conectado al ordenador, donde la señal proveniente del acondicionador será procesada utilizando MatLab. En paralelo, la señal de presión y de posición angular se registrará en un osciloscopio digital marca GW Instek GDS - 2062 y una memoria de almacenamiento digital USB portátil para su procesamiento manual utilizando Excel.

En la Fig. 1 se muestra el esquema de conexionado simplificado para medición en paralelo de ambos sistemas.

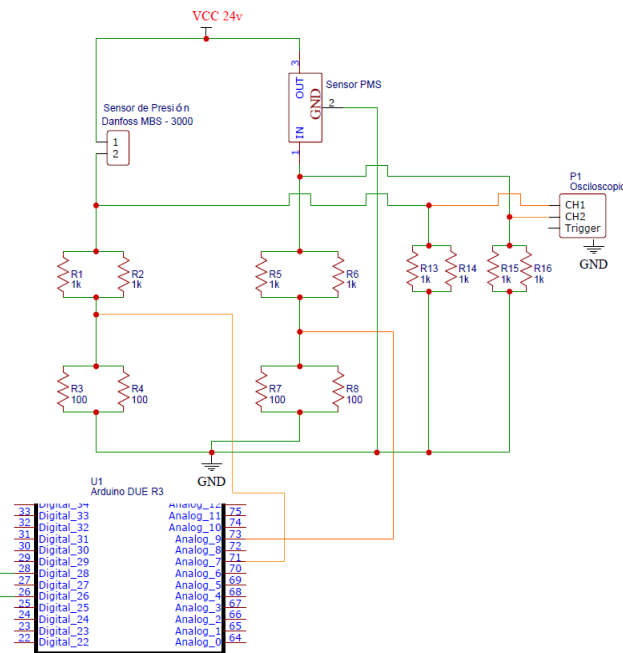


Fig. 1: Circuito de medición Arduino + Osciloscopio en paralelo. Simplificado a la zona de adquisición de datos.

III. MONTAJE EXPERIMENTAL.

La validación del procedimiento experimental se llevó a cabo sobre un motor vehicular marca Fiat, cuyos datos se muestran en la TABLA 1. Para la realización de los ensayos se utilizó el banco dinamométrico hidráulico instalado en el Laboratorio de Máquinas Térmicas y Termofluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Marina Mercante, en la ciudad de Buenos Aires a nivel del mar.

TABLA 1
DATOS TÉCNICOS DEL MOTOR

| | |
|---|---------------------------|
| Marca | Fiat |
| Modelo | 138A028. |
| Diámetro (D) x Carrera (C) | 86,4 x 63,9 (mm) |
| Volumen de la cámara de combustión (V ₂) ^a | 41,12 (cm ³) |
| Cilindrada unitaria (V _c) | 374,64 (cm ³) |

^a Valor medido en el laboratorio.

| | |
|--|---------------------------|
| Cilindrada total (V _{ct}) | 1498 (cm ³) |
| Volumen total del cilindro (V ₁) | 415,76 (cm ³) |
| Relación de compresión (ε) ^b | 41,12 (cm ³) |
| RPM (max. Potencia) | 5600 (1/min) |
| RPM (max. Torque) | 3000 (1/min) |
| Nº cilindros | 4 |
| Ciclo | Otto 4 T |

El procedimiento experimental se llevó a cabo permitiendo que el motor alcanzara su temperatura de régimen. Se extrajo la bujía de encendido del cilindro número cuatro, donde se instaló el sensor de presión MBS 3000. El sensor de posición angular se instaló a modo de referencia fija sobre un soporte adicionado, de cara a la polea del eje cigüeñal, enfrentando la marca de puesta a punto de la distribución.

Para la determinación exacta del PMS se instala un disco graduado en la polea del cigüeñal y un puntero laser como referencia fija externa al motor. Se rosca en el orificio de la bujía de encendido un tope mecánico ajustable capaz de interrumpir la carrera del pistón cuando se gira en un sentido arbitrario cualquiera. Cuando se hace tope, se gira el cigüeñal en sentido contrario midiendo el corrimiento angular con el puntero laser sobre el disco graduado hasta que el pistón vuelve a hacer contacto contra el tope mecánico. En estas condiciones, se retira el tope mecánico, y el ángulo que resta girar en el mismo sentido para alcanzar el PMS se calcula como:

$$\text{ángulo al PMS} = \frac{(360^\circ - \text{ángulo medido})}{2} \quad (1)$$

Haciendo funcionar el motor a plena carga y velocidad de giro constante en tres cilindros, se registraron los ciclos sin combustión en el cilindro número cuatro. Durante las pruebas, sobre la misma base de tiempo, se tomaron simultáneamente las señales del sensor de presión y de punto muerto superior. El esquema general del montaje experimental y de adquisición de datos se muestra en la Fig. 2.

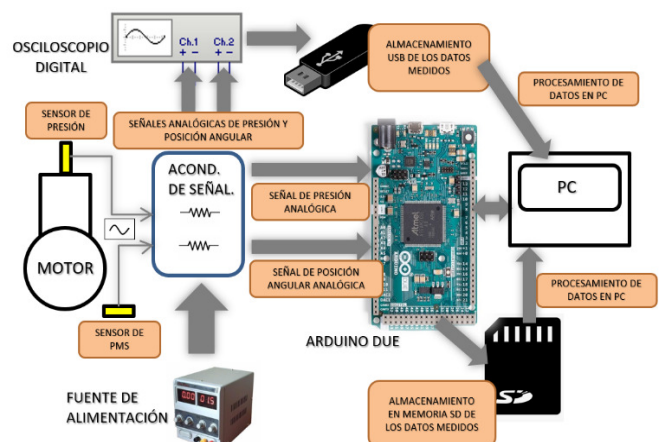


Fig. 2: Esquema del Sistema de adquisición y procesamiento de datos.

^b Valor calculado a partir de (V₂).

IV. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

Para el desarrollo de la metodología propuesta se desarrollaron dos software. El primero, denominado “Medición de presión” en lenguaje C++ para la obtención de las señales provenientes de los sensores a través del microcontrolador Arduino DUE. El mismo tiene por objeto tomar una lectura constante de las señales de presión y PMS a través del circuito de acondicionamiento de señal, y mediante la interacción con el usuario se realizan las mediciones del ensayo y se almacena la información de los valores leídos en una memoria SD en formato .csv para luego ser procesados. El segundo, denominado “Procesamiento de mediciones”, se desarrolló en MatLab (versión R2017b), el cual tiene por objeto procesar la señal de tensión proveniente del microcontrolador ARDUINO como así también resulta adaptable a mediciones desde el Osciloscopio, convirtiéndola en valores de presión. Al mismo tiempo, este último programa realiza la correlación de las señales de presión y PMS, obteniendo así el ciclo promedio más probable para el régimen evaluado. El esquema conceptual para el procesamiento de los datos se muestra en la Fig. 3.

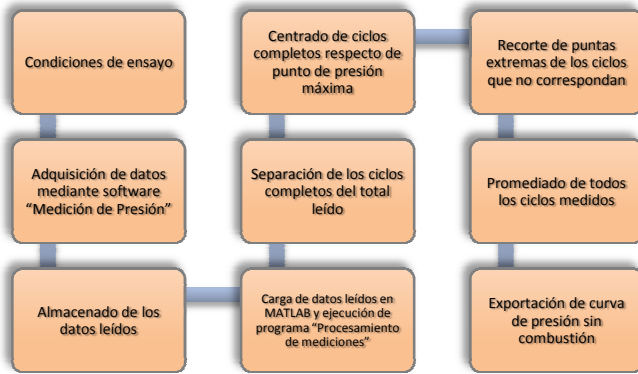


Fig. 3: Diagrama de flujo de procesamiento a través de software.

V. CORRELACIÓN TIEMPO – VOLUMEN.

La variación de volumen que experimenta el cilindro a lo largo del ciclo de trabajo es función del ángulo recorrido por el eje cigüeñal. Esta función cíclica puede establecerse a partir del estudio cinemático del movimiento biela – manivela. Sin entrar en detalles matemáticos que el lector podrá consultar en la literatura especializada, la función del desplazamiento del émbolo puede transformarse en la expresión del volumen, simplemente multiplicando el desplazamiento lineal del pistón por el área del cilindro, adicionando luego el volumen de la cámara de combustión. Simplificando los cálculos, para el motor de pistón centrado:

$$V(\alpha) = S \cdot r \cdot (1 - \cos(\alpha)) + S \cdot \frac{r}{\varphi} \cdot (1 - \sqrt{1 - \varphi^2 \cdot \sin^2(\alpha)}) + V_2 \quad (2)$$

$V(\alpha)$: volumen del cilindro para un ángulo α .

S : área de la sección transversal del cilindro.

r : radio de manivela ($r = C/2$).

φ : relación de volteo del cigüeñal ($\varphi = l/r$).

l : longitud de la biela entre centros.

VI. ADQUISICIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO

A. Ajustes del sistema sensor – acondicionador – osciloscopio digital.

El sensor de PMS emite una señal del tipo escalón (en tensión) cada vez que la marca sobre la polea del cigüeñal que indica el paso del pistón por dicho punto la enfrenta. Para el motor 4T un ciclo de trabajo estará compuesto por tres de estas señales: la primera cuando el pistón pasa por el PMS al inicio de la carrera de admisión, la segunda al inicio de la expansión, y la tercera que indica el fin del ciclo coincidirá con la primera del ciclo siguiente. Para una velocidad de rotación fija, dividiendo el intervalo entre los flancos ascendentes de la primera y tercera señal por la cantidad de grados recorridos en un ciclo de trabajo (720°), se establece la constante que permite pasar la base de tiempo a grados de giro α , y por consiguiente a valores de $V(\alpha)$.

Como la señal del sensor de presión se adquiere simultáneamente con la de PMS, utilizando ambas la misma base de tiempo, las curvas quedan registradas en forma superpuesta, una en cada canal del osciloscopio digital. De modo que es sencillo conocer la presión que el sistema desarrolló para cada ángulo α recorrido, y por lo tanto para cada volumen $V(\alpha)$ observado en el interior del cilindro.

En los sistemas digitales de medición y adquisición de datos, resulta de vital importancia realizar una correcta selección del tiempo de muestreo. En general los sensores electrónicos superan holgadamente en velocidad de respuesta a los sistemas mecánicos a los que se aplican, por lo que el sensor se mantiene en reposo mucho más tiempo que el que detecta la señal. Esta baja frecuencia de operación determina que, si la velocidad de muestreo no es la correcta, se pierdan datos. Esto es lo que ocurre típicamente con el sensor de PMS, incluso a altas velocidades de rotación. No así con el sensor de presión, cuya señal analógica varía permanentemente.

Los parámetros que determinan la medición son los siguientes:

Memory Length (ML): capacidad de la memoria de almacenamiento del osciloscopio.

Time base (Tb): base de tiempo de la medición (escala del eje horizontal del osciloscopio).

Sampling rate (SR): tasa de medición de las muestras. Corresponde a la cantidad de mediciones que se realizan por segundo.

La combinación de la capacidad de almacenamiento (ML) y de la base de tiempo (Tb), determina la tasa de medición de la lectura o Sampling Period (t). Esta tasa de medición define el período, que representa el tiempo entre cada muestra. Cuanto menor sea ésta, mejor resolución tendrá las lecturas y se evitará perder mediciones.

De la combinación del Sampling Period (t) y Memory Length (ML) se obtiene el tiempo total evaluado (T):

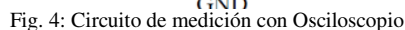
$$T = ML \cdot t \quad (3)$$

$$T = \frac{ML}{SR} \quad (4)$$

Minimizar la incertidumbre implica que, para cada velocidad de giro se desea tener la mayor cantidad de ciclos disponibles, motivo por el cual el tiempo total debe ser el mayor posible. Para un valor definido (ML) por la capacidad

La elección del Sampling Rate está definida por el tiempo mínimo de respuesta del sistema, es decir, el tiempo mínimo requerido entre muestras para que al momento de realizar la lectura de PMS, no se pierda ninguna de ellas.

VCC 24v

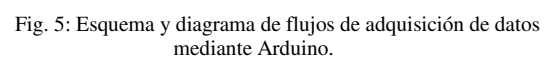


En la Tabla 2 pueden verse los valores pre ajustables del Sampling Rate que ofrece el instrumento, así como los valores que corresponden a la frecuencia de muestreo y el tiempo máximo que el instrumento permite observar. Cada uno de estos valores tiene un correlato con la duración de cada rotación para los valores de velocidad pre fijados, así como también la cantidad de señales que el sistema podría adquirir a esas mismas velocidades.

| SR (muestras/seg) | t (ms) | T (s) | Tiempo/rev. (seg.) | | Revoluciones medidas | | Ciclos medidos | |
|----------------------|-----------|----------|-----------------------|-------------|-------------------------|-------------|-------------------|-------------|
| | | | 1000 RPM | 3600 RPM | 1000 RPM | 3600 RPM | 1000 RPM | 3600 RPM |
| 50000 | 0,02 | 0,25 | 0,06 | 0,0167 | 4,167 | 15 | 2 | 7 |
| 25000 | 0,04 | 0,5 | 0,06 | 0,0167 | 8,333 | 30 | 4 | 15 |
| 10000 | 0,1 | 1,25 | 0,06 | 0,0167 | 20,83 | 75 | 10 | 37 |
| 5000 | 0,2 | 2,5 | 0,06 | 0,0167 | 41,67 | 150 | 20 | 75 |
| 2500 | 0,4 | 5 | 0,06 | 0,0167 | 83,33 | 300 | 41 | 150 |
| 1000 | 1 | 12,5 | 0,06 | 0,0167 | 208,33 | 750 | 104 | 375 |

La medición a través de la placa Arduino se realiza como indica el circuito de la Fig. 6, similar al utilizado para el osciloscopio, pero con un acondicionamiento apropiado para las tensiones de trabajo menores de este equipo.

La memoria del microcontrolador permite adquirir hasta un límite práctico de 7.000 mediciones totales, por lo que se deberá observar las mismas precauciones en los límites técnicos para definir el período de muestreo, que cuando se utiliza el osciloscopio. En este caso el período de muestreo no se encuentra definido por el equipo, sino que es indicado por el usuario, pudiéndose elegir cualquier valor entero positivo entre 50 μ s y 600 μ s. La captura de datos se efectiviza a través de un pulsador que acompaña al circuito, una vez cargado el programa en el controlador, y con el motor en condiciones régimen para medir.



Una vez obtenidos los valores de presión y posición del PMS, se inicia la etapa de procesamiento de datos. En forma

resumida, se busca separar cada ciclo completo obtenido en el intervalo de medición, tomando como referencia el PMS al inicio de la admisión, centrar los mismos respecto de una posición fija que corresponderá al punto de máxima presión desarrollada, y así, obtener la curva promedio más representativa en el intervalo considerado.

Se utilizarán las mismas etapas para la evaluación de las curvas, ya sea para el procesamiento manual, como así también con el software MatLab. Estas etapas son las que se enumeran a continuación:

1. Obtención de datos de las mediciones.
2. Separación de los ciclos completos medidos y descarte de los ciclos incompletos al inicio y final de la medición.
3. Centrado de los mismos.
4. Eliminación de los puntos extremos de cada ciclo.
5. Promedio de los ciclos y obtención de la curva final presión – tiempo.

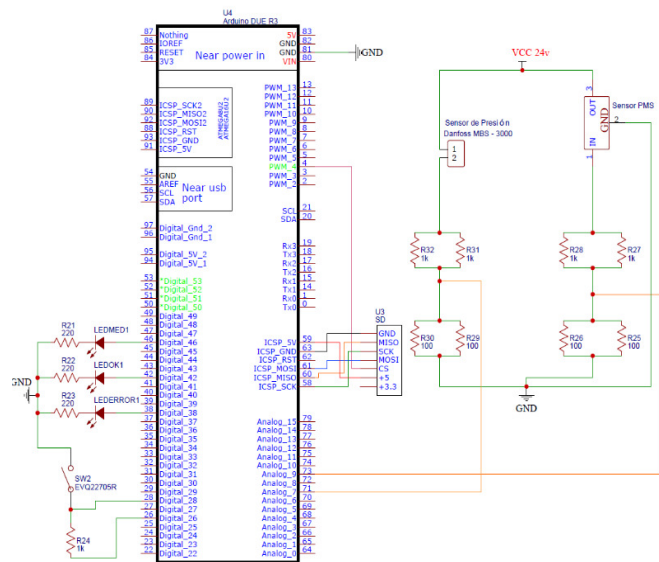


Fig. 6: Circuito eléctrico acondicionador de señal para medición a través de Arduino.

1. Obtención de datos de las mediciones.

Para la obtención de los valores, se realiza el ensayo con el motor en las condiciones descritas en el apartado III, midiendo con el microcontrolador Arduino por un lado, y al mismo tiempo con el osciloscopio. Se obtienen así, 7.000 y 12.500 valores analógicos respectivamente, de presión y posición del PMS en un archivo formato .csv, dispuestos en dos columnas procesables a través de Excel.

Se realiza el cálculo de la velocidad de giro correspondiente a la medición, contando la cantidad de ciclos completos medidos y el tiempo total en el cual se desarrollaron. La velocidad resultante se calcula mediante la ecuación:

$$v[rpm] = \frac{Nc[ciclos]}{TiempoTotal[s]} \cdot \frac{60[s]}{[min]} \cdot \frac{2[revoluciones]}{[ciclo]} \quad (5)$$

2. Separación de los ciclos completos medidos

Se procede a separar cada ciclo completo medido, utilizando la señal correspondiente al PMS que indica el inicio de la admisión. Para esto, se evalúa la columna de

datos correspondiente al PMS en busca del primer valor de señal alto que se corresponda con un valor por debajo del mínimo de reposo del sensor de presión, correspondiente a valores de presión por debajo de la presión atmosférica, típicos de la fase de admisión.

| | PRESION | PMS |
|-----|---------|-----|
| 553 | | |
| 554 | 23 | 0 |
| 555 | 22 | 3 |
| 556 | 22 | 0 |
| 557 | 22 | 115 |
| 558 | 23 | 114 |
| 559 | 22 | 115 |
| 560 | 23 | 115 |
| 561 | 23 | 113 |

Fig. 7: PMS de inicio de admisión correspondiente con valores analógico de presión baja.

| | PRESION | PMS |
|-----|---------|-----|
| 264 | | |
| 265 | 124 | 2 |
| 266 | 123 | 1 |
| 267 | 127 | 3 |
| 268 | 126 | 0 |
| 269 | 127 | 114 |
| 270 | 128 | 114 |
| 271 | 127 | 114 |
| 272 | 128 | 114 |

Fig. 8: PMS de final de compresión, correspondiendo con valores analógico de presión alta.

Las Fig. 7 y 8 permiten observar cómo debido a la velocidad de respuesta del sistema de medición la señal de PMS se sostiene durante varias muestras, definiendo una típica señal escalón, o señal cuadrada. Se toma como inicio del ciclo el flanco ascendente correspondiente a la primera lectura alta.

A partir de este punto, las mediciones obtenidas entre los dos flancos consecutivos siguientes muestran el desarrollo de las carreras de admisión y compresión, y expansión y escape, a partir del cual inicia el ciclo siguiente. Este procedimiento repetido para todo el conjunto de la muestra permite organizar los datos en columnas alineadas y paralelas con el objeto de graficar la superposición y establecer el promedio para cada intervalo de medición en busca del valor que mejor represente el fenómeno.

Aquellos ciclos que no se encuentren completos, es decir, que no comienzan en el PMS correspondiente al inicio de la admisión, o que no finalice en el PMS correspondiente al final de la carrera de escape, se descartan y no se toman en cuenta.

3. Centrado de ciclos completos

Una vez ubicado cada uno de los ciclos en columnas paralelas entre sí, se los centra respecto del punto de máxima presión, que corresponde al final de la carrera de compresión. Se centran las mediciones utilizando su índice (número de celda y fila del vector) de valor máximo.

En la Fig.9, puede observarse un intervalo con 220 valores totales (Vt). De los cuales, los valores de índice 113 a 116 corresponden al máximo valor analógico de presión (126). Tomando la mediana de estos índices, y redondeando hacia abajo cuando la cantidad de datos es un número par, se obtiene el valor central del intervalo (VC). En este caso, VC

se encuentra en el índice 114, y se obtienen 113 valores hacia arriba de la fila ($VC - 1$), y 105 valores hacia bajo de la misma ($Vt - VC - 1$).

Este procedimiento tiende a minimizar el error que provoca el desfase de las curvas, produciendo un ensanchamiento que dará por resultado un área por debajo de la curva más grande. Fenómeno que puede apreciarse a simple vista en la curva de presión bruta de la Fig. 10.

Este error de método debe evitarse, ya que el área por debajo de la curva de compresión representa el trabajo suministrado al fluido durante dicha carrera. Éste es un trabajo negativo, que se resta al trabajo útil y dará por resultado un valor de potencia menor al realmente desarrollado.

| INDICE | PRESION | PMS |
|--------|---------|-----|
| 102 | 103 | 1 |
| 103 | 109 | 4 |
| 104 | 109 | 0 |
| 105 | 114 | 3 |
| 106 | 114 | 1 |
| 107 | 119 | 2 |
| 108 | 119 | 1 |
| 109 | 122 | 2 |
| 110 | 124 | 0 |
| 111 | 123 | 115 |
| 112 | 125 | 114 |
| 113 | 126 | 113 |
| 114 | 126 | 113 |
| 115 | 126 | 114 |
| 116 | 126 | 115 |
| 117 | 124 | 115 |
| 118 | 123 | 113 |
| 119 | 121 | 114 |
| 120 | 120 | 114 |
| 121 | 117 | 41 |
| 122 | 118 | 40 |
| 123 | 111 | -1 |
| 124 | 112 | 0 |
| 125 | 106 | 3 |
| 126 | 105 | 1 |
| 127 | 102 | 2 |

Fig.9: Final de compresión (valor analógico de presión alta)

Otro posible error de método que debe sistematizarse para mejorar los resultados, puede aparecer al calcular la mediana de los valores correspondientes a las presiones máximas y redondear por defecto, por cuanto debe establecerse un criterio, manteniéndose constante para la selección del índice a lo largo de todo el proceso.

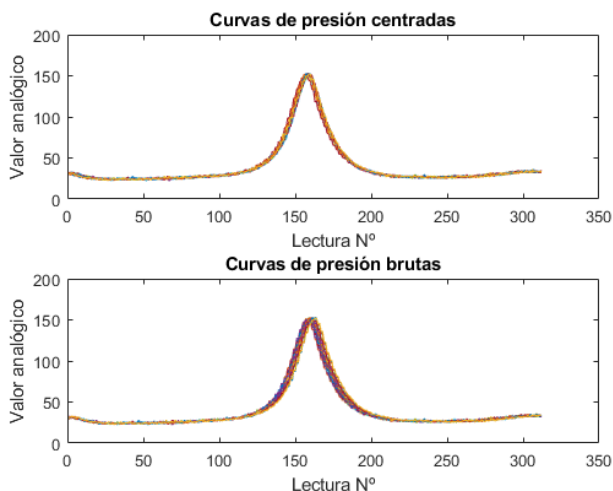


Fig.10: Comparación entre curvas de ciclos centrados y no centrados.

4. Eliminación de puntos extremos de cada ciclo.

Finalizado el proceso de ordenar y centrar los ciclos respecto de su valor máximo en presión, se realiza un trabajo de igualar la cantidad de mediciones que conforman cada ciclo, eliminando los valores extremos que superen la

media. Por tratarse de valores muy próximos a la presión atmosférica, su descarte no resulta relevante a los efectos de obtener la curva más representativa de la presión en el interior del cilindro. Finalmente, se tienen todos los ciclos centrados y con la misma cantidad total de mediciones.

5. Promediado de los ciclos y obtención de la curva final presión – tiempo.

Por último, se realiza el promedio de todas las curvas, para obtener así la curva final que mejor representa todos los ciclos evaluados para el ensayo, a la velocidad establecida. Las mismas se muestran en la Fig. 11 para el caso centrado y no centrado. Para los cálculos de trabajo y potencia se tomará como válida la curva promedio centrada.

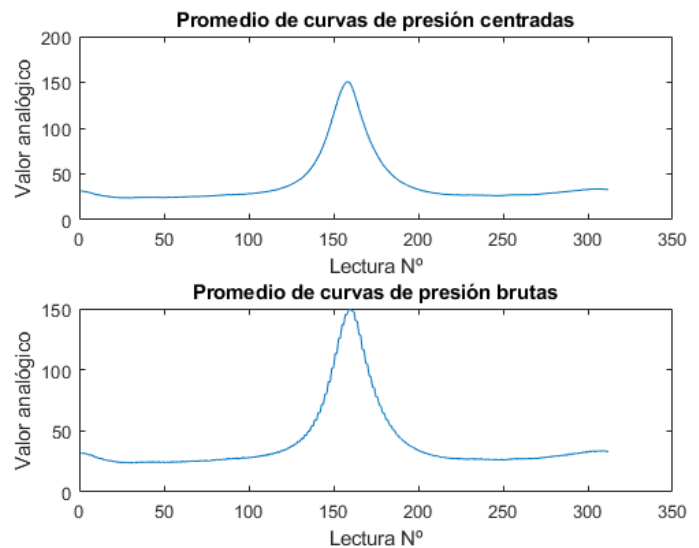


Fig. 11: Diferencia entre una curva promedio centrada con respecto al valor de presión máximo, y la misma curva sin realizar el filtrado y centrado de los valores.

VII. CALIBRACIÓN DEL SENSOR DE PRESIÓN.

El modelo CIPREV para la estimación del ciclo indicado de los motores de combustión se caracteriza por utilizar sensores de uso habitual en la industria, bajando de esta forma los costos en equipamiento. En este caso se utilizó un sensor marca Danfoss cuyas características se muestran en la Tabla 3.

TABLA 3
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL SENSOR DE PRESIÓN.

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| Marca | Danfoss |
| Modelo | MBS 3000. |
| Tipo | 2211-1 AB04 |
| Código | 060G1133 |
| Rango | 0 – 16 bar |
| Señal de salida | 4 – 20 mA |
| Tensión de alimentación U_B | 9 – 32 Vcc. |
| Carga conectada a 0V | $R_c \leq (U_B - 9V)/0,02$ |

Para trazar la curva de calibración se construyó un banco con un conducto múltiple donde se conectaron el sensor y un manómetro de referencia. Por una tercera

conexión se permite suministrar aire comprimido proveniente de un regulador de presión ajustable. Según la hoja de datos del sensor se procedió a armar el circuito de calibración alimentando el mismo con una fuente regulable a un valor nominal de tensión $E = 24V_{cc}$, y se procedió al cálculo de la resistencia de carga utilizando los datos del fabricante ($R_c \leq 750\Omega$). Por último, se materializó el circuito con una resistencia $R_c = 500\Omega/0,25W$, y la tensión real de alimentación $E = 23,5V_{cc}$, según se muestra en la Fig. 12.

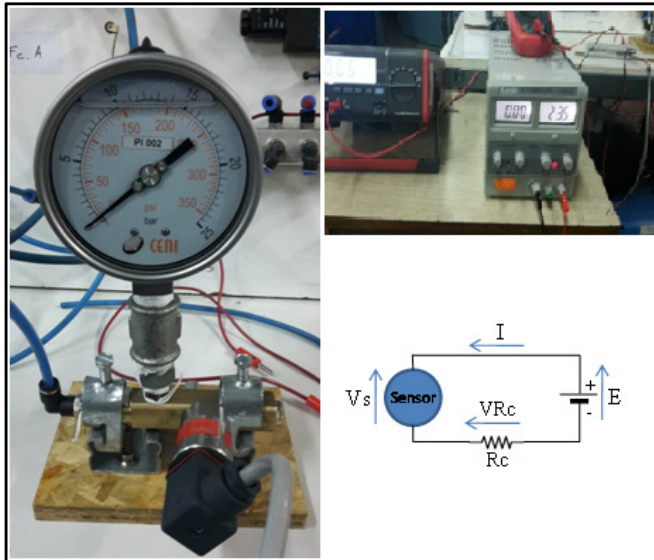


Fig. 12: Banco y esquema del circuito para calibración del sensor de presión.

La Fig. 13, muestra la curva final de calibración, de donde puede obtenerse la ecuación de conversión de los valores de tensión observados en el voltímetro, a presión (p):

$$p = \left[\frac{(V_s - 1,835)}{0,508} \right] \pm 0,01 \quad (6)$$

Donde V_s es la caída de tensión en el sensor de presión.

Esta misma ecuación es utilizada para la versión micro asistida por medio del sistema Arduino.

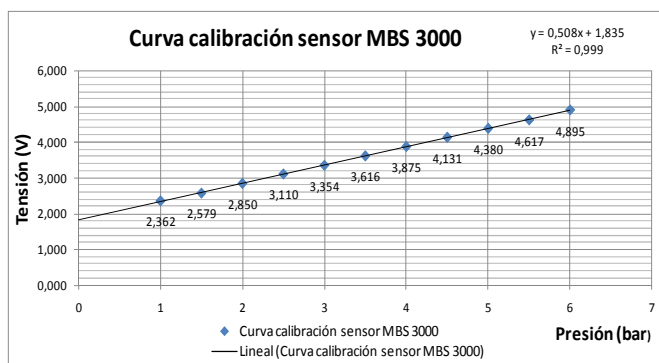


Fig. 13: Curva de calibración del sensor de presión.

VIII. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Los siguientes resultados se obtuvieron durante un ensayo realizado con el motor a plena carga a un régimen de rotación nominal de 4330 rpm durante un período de

muestreo de $80\mu s$. La adquisición de datos se realizó en paralelo, con el osciloscopio y el sistema microcontrolado Arduino simultáneamente, para así establecer la comparación de resultados bajo las mismas condiciones operativas.

Las curvas obtenidas mediante el uso del Osciloscopio se procesaron en forma manual a través de Excel y MatLab, como se muestra en la Fig. 14 y Fig. 15, verificando la facilidad que provee el uso de esta herramienta para el procesamiento de datos. Las curvas correspondientes a las mediciones realizadas por el Arduino fueron procesadas directamente con MatLab y se muestran en la Fig. 16.

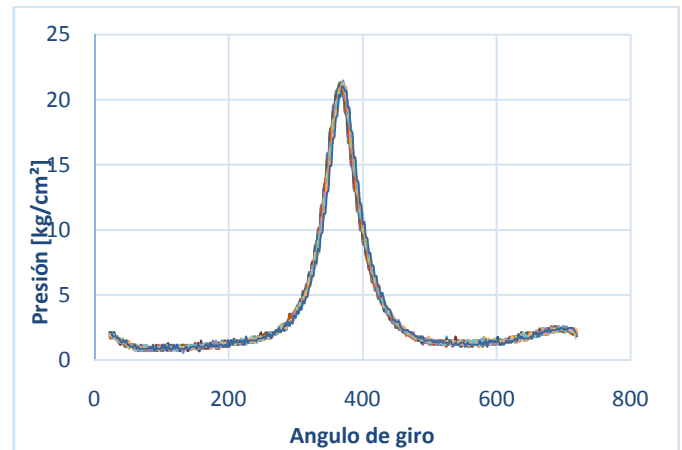


Fig.14: Medición con Osciloscopio. Ciclos procesados manualmente a través de Excel.

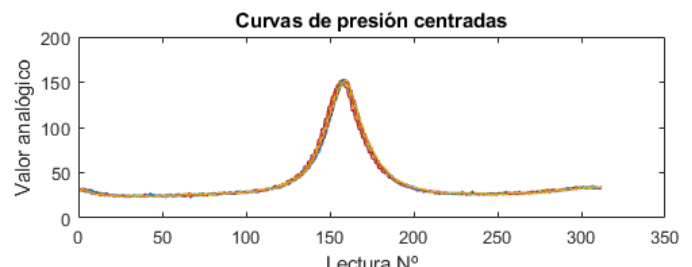


Fig.15: Medición con osciloscopio. Ciclos procesados en forma automática a través de MatLab.

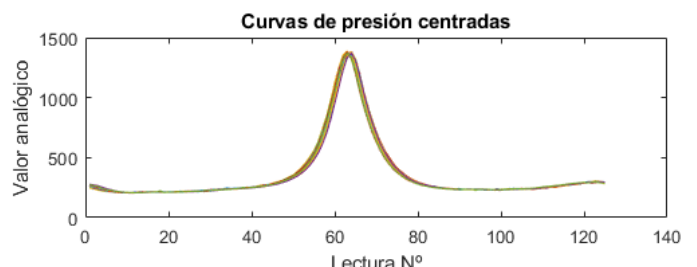


Fig. 16: Medición con Arduino. Ciclos procesados de forma automática a través de MatLab.

XIX. CONCLUSIONES.

Herramientas computacionales como MatLab permiten sistematizar errores de método que pueden aparecer fácilmente durante el procesamiento manual de resultados, especialmente en la tarea de centrado de las curvas, lo que

puede ocasionar una dispersión mayor en los valores cercanos a la presión máxima.

Otro punto fuerte a favor del sistema microcontrolado es la velocidad de procesamiento de la información que supera ampliamente al de la labor manual, facilitando el trabajo. Esto resulta especialmente útil para minimizar la incertidumbre, ya que se requiere la evaluación de más de cien ciclos completos para obtener valores confiables, y el trabajo manual demanda largos periodos de tiempo.

Los resultados muestran que la implementación del microcontrolador Arduino es una forma equivalente y alternativa a realizar la medición con el método tradicional a través del osciloscopio. También permite un amplio campo de aplicaciones, ya sea desde la observación en tiempo real, adquisición de datos en periodos menores para almacenar registros fuera de ensayos, implementación de la manipulación del banco de pruebas desde una consola comandada por el propio microcontrolador o futuras adaptaciones de las celdas de carga y sensor de posición angular al propio microcontrolador, pudiendo ser aplicado para el ensayo de potencia al freno en tiempo real. Por otro lado, al ser una tecnología open source, puede ser adaptado

a voluntad y modificado por el usuario para su máximo provecho, no quedando limitado a un uso específico.

En cuanto a la etapa de procesamiento a través de MatLab, se puede afirmar que es una mejora sustancial al proyecto y a la metodología de los ensayos propuestos en el modelo CIPREV, debido a la velocidad de procesamiento de los valores medidos, economizando tiempos y mejorando la calidad de los valores y la trazabilidad final, sistematizando y minimizando los errores de método.

REFERENCIAS.

- [1] E. S. Castaño Mesa, S. H. Quintana, I. D. Bedoya, y A. Amell Arrieta, "Criterios para el procesamiento y evaluación de datos experimentales para un motor de encendido provocado de alta relación de compresión," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 12, no. 23, pp. 107-125, enero – junio 2016.
- [2] H. Moore, *MATLAB para ingenieros*, Salt Lake City, Utah: Pearson, 2007.
- [3] C. P. López, *MATLAB Control Systems Engineering*, Berkeley, CA: Apress, 2014.
- [4] W. Bolton, *Mecatrónica. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. Un enfoque multidisciplinario*, 5^{ta}ed, México: Alfaomega, 2013.